

## 基于等概率路由模型的传感器网络负载均衡研究

解文斌 鲜 明 陈永光

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要:** 无线传感器网络的能耗效率与流量负载分布密切相关。论文从微观角度研究了无线传感器网络的负载均衡问题。基于等概率路由模型,分析了拓扑传输结构对于感知数据流量的分流作用。根据分析结果,提出了多对一传输模式下任意节点负载密度的定义和算法。分析了节点的负载密度与传感器网络生命期的关系,进一步论证了在多对一的多跳传感器网络中不能实现完全的负载均衡,但是通过设计合理的拓扑结构可以实现准负载均衡。仿真结果说明,从微观角度得到的节点负载密度可以准确描述无线传感器网络的流量负载分布,由此得到的准负载均衡条件也能实现绝大多数节点的负载均衡。

**关键词:** 无线传感器网络; 负载均衡; 网络生命期; 等概率路由

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)05-1205-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2009.00201

## Load Balancing for Wireless Sensor Networks Based on an Equiprobable Routing Model

Xie Wen-bin Xian Ming Chen Yong-guang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The efficiency of energy consumption in wireless sensor networks is closely related to the traffic of each node. In this paper, the issue of load balancing in wireless sensor networks is researched on the microscopic scale. Based on an equiprobable routing model, the relationship between topology structure and data traffic distribution is established. Based on the analytical results, the definition and the distributed algorithm of load density of any node in many-to-one sensor networks are proposed. Based on the first order radio model, the relationship between load density and network lifetime is analyzed. In spite of the fact that complete load balancing in wireless sensor network is unreachable, suboptimal load balancing is possible if the topology structure is well-designed. Simulation results show that the load distribution of wireless sensor networks can be described accurately by load density, and load balancing of most nodes is possible if topology structure meets suboptimal conditions.

**Key words:** Wireless sensor networks; Load balancing; Network lifetime; Equiprobable routing

### 1 引言

无线传感器网络的能耗效率与流量负载分布密切相关。多对一是无线传感器网络数据传输的一种典型结构<sup>[1]</sup>,具有独特的流量分布特点。在从源节点到 sink 节点的多对一传输中,只要不进行数据聚合,无论采用何种路由协议,都会使大量的数据拥挤到 sink 周围。某些中间节点除了发送自身的感知数据,还消耗大量的能量转发数据,导致某些节点的能量快速耗尽,出现“能量空洞”,从而影响整个网络的生命期。这种现象也称为“漏斗效应(funneling effect)”<sup>[2]</sup>，“sink 邻居问题(sink neighborhood problem)”<sup>[3]</sup>或“中心拥挤效应(crowded center

effect)”<sup>[4]</sup>。文献[5]研究了由于设备故障和电池能量耗尽而引起的节点衰变(aging)效应,说明了节点到 sink 的跳数对于节点能耗和网络连通性具有重要影响。文献[6]假设节点均匀分布在一个半径为  $R$  的圆形区域内,给出了单路径和多路径路由机制下的节点流量负载公式。文献[7]在节点密集分布和理想的负载均衡最短路径路由假设条件下,给出了当基站处于最优位置时各个传感器节点的平均流量负载,通过解析表达式说明了数据流量迅速向基站集中的现象。通过改变数据的传输结构,文献[8-15]给出了解决负载不均衡问题的思路。文献[8,9]提出了一种节点非均匀分布的策略,以实现节点的次优能耗均衡。针对密集的多跳无线网络,文献[10-12]把负载均衡问题形式化为在所有源-目标节点对之间寻找最小的标量报文量(流量负载)的连续曲线(路线)问

题,说明了可以通过单路径路由获得最优的负载分布<sup>[10]</sup>。文献[13]在网络非常密集的约束条件下,模拟几何光学里的光线折射定律,从宏观角度研究了无线网络的最优路由问题。文献[4]中通过把最优的路由路径模拟为几何光学里的光线传播,给出了连续网络模型下流量负载的概率密度公式,得到了负载均衡的路由算法,但是计算难度很大。文献[14]针对1维的线性网络拓扑,提出了根据节点与sink之间的距离确定传输功率的方法。其中,文献[4,6,10-12]假设所有源-目标节点对均匀分布于给定圆形区域内,因此得到的是sink遍历该区域的平均负载分布。而文献[7]假设sink节点位于传感器网络的质心位置,得到的是特殊条件下多对一的流量负载分布。此外,文献[4-7,10-14]中都采用了文献[15]中引入的连续拓扑模式。该模式在网络密集条件下,用连续的流体代替网络连接和节点,从源节点到目标节点的最短路径就成为连续的线段。通过把网络抽象为一个连续的空间,便于利用电磁学、几何光学等理论和微积分工具进行分析,因此该模式近年来被广泛应用。采用连续空间假设不需要考虑每一个节点的具体分布位置,忽略节点之间的拓扑结构,结果是对网络流量分布的宏观描述,可以得到距离sink越近的节点越容易快速耗尽能量的直观感受。然而,宏观描述的缺点是不够精确,当不满足节点密集分布的条件时,不能采用连续拓扑模式。而且,模拟电磁场和光学等方法所涉及的微积分方程的计算较为复杂,难以适应传感器网络实际应用的要求。

本文在微观层面上研究了网络拓扑结构对于无线传感器网络数据流量的分流作用,以及由此导致的负载不均衡和能耗不均衡效应。基于等概率路由模型,分析了拓扑传输结构对于感知数据流量的分流作用。针对多对一的网络数据传输模式,提出了任意节点负载密度的定义和分布式算法。根据能耗模型分析了节点的负载密度与传感器网络生命期的关系。进一步论证了在多对一的多跳传感器网络中不能实现完全的负载均衡,但是通过设计合理的拓扑结构可以实现准负载均衡。最后通过仿真实验说明了从微观角度得到的节点负载密度是有效的,可以准确描述无线传感器网络的流量负载分布,由此得到的准负载均衡条件也能实现绝大多数节点的负载均衡。本文提出的方法不需要对传感器节点的分布情况和密度进行任何假设,对于密集或稀疏分布都适用。

## 2 网络模型和假设

假设无线传感器网络由 $N$ 个随机分布的节点组

成,用无向图 $G(V, E)$ 表示,其中 $V \subset R^2$ ,表示欧氏平面上的节点集, $E \subset V^2$ 表示边的集合, $N = |V|$ 。假设所有节点具有相同的通信半径 $R$ ,当且仅当节点 $u, v$ 之间的距离 $d(u, v) \leq R$ 时,边 $(u, v) \in E$ 。

本文中假设一种时间驱动的多对一的传感器网络数据传输场景,即所有传感器节点都能产生感知数据,每一轮次都参与数据传输过程。中继节点不对数据进行压缩或聚合,即不改变数据大小,也不产生计算能耗。

采用等概率的路由模型,去除任何有偏好的路径选择因素,即认为每一条链路的指标都是相同的。这样从源节点到sink节点的路由开销只与跳数有关。对于任意节点,从直连的上层父节点集中任选一个转发数据,其代价和选择概率都是相同的。通过等概率选择最小跳数路径,便于分析数据传输拓扑对节点流量分布的影响。实际上,文献[5-9]中也采用了等概率选择路由的隐含假设。

实际上,在节点密集分布的假设下推导流量负载分布也隐含了采用最短路径路由,如文献[4,6,7]。在从源节点到目标节点的多跳传输中,源节点的数据将沿一条曲折的路径流向目标节点。当网络变得越来越密的时候,这些曲折的路径将越来越接近直线,从而可以把网络视为一个连续的空间,源节点和目标节点之间沿一条直线进行通信<sup>[4]</sup>。所不同的是,在Ad hoc网络中目标节点不是固定的,而无线传感器网络中的目标节点就是sink,执行的是多对一的多跳通信。

## 3 多对一网络的流量负载分析

### 3.1 任意节点的流量负载构成

源-目标节点对之间的通信路径是由网络的拓扑结构决定的。如图1所示,在所有节点数据向sink流动的过程中,不同节点的负载差异仅取决于从子节点接收的数据。假设每一个节点在每一轮数据收集过程中产生 $L$  bit数据,则节点 $u$ 在每一轮需要传输的总流量为

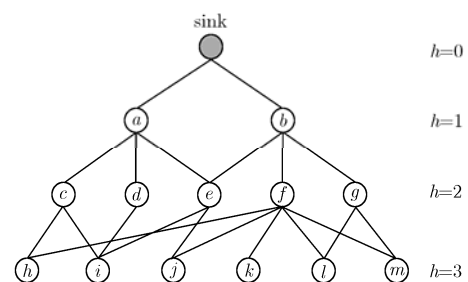


图1 多对一的传感器网络数据收集拓扑

$$\varphi_u = L_u^c + L = \left( N_u^c \cdot L + \sum_{v=1}^{N_u^c} L_v^c \right) + L \quad (1)$$

其中  $L_u^c = N_u^c \cdot L + \sum_{v=1}^{N_u^c} L_v^c$  为节点  $u$  从其子节点集接收的流量,  $N_u^c$  为节点  $u$  的子节点数,  $L_v^c$  为子节点  $v$  从其子节点集接收的流量。

在数据路由过程中, 拓扑结构对于数据的分流具有重要作用。基于等概率路由模型, 对于网络中的任意节点  $v$ , 其父节点数为  $N_v^p$ , 若以概率  $1/N_v^p$  随机选择父节点, 则经过  $T$  轮后, 节点  $v$  的数据将依概率  $p$  平均发送到  $N_v^p$  个上层节点,  $\lim_{T \rightarrow \infty} p \rightarrow 1$ 。节点  $v$  的父节点以同样的方式继续向上层节点分流数据, 一直持续到所有数据都到达 sink 时。因此, 网络中任意节点的流量负载就是从其子节点集中接收的数据加上自己产生的数据。经过  $T$  轮数据收集过程后, 任意节点  $u$  的总流量负载为

$$\Phi_u(T) = \sum_{t=1}^T \varphi_u(t) = \sum_{t=1}^T L_u^c(t) + L \cdot T \quad (2)$$

在等概率选择父节点条件下, 有

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T L_u^c(t) = L \cdot T \cdot \sum_{v \in D(u)} \xi_u(v) \quad (3)$$

其中  $D(u)$  表示节点  $u$  所有子孙节点的集合,  $\xi_u(v)$  表示节点  $v$  的流量依概率分配到节点  $u$  的部分流量。因此, 网络中任意节点  $u$  在每一轮中的平均流量负载为

$$\bar{\varphi}_u = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\Phi_u(T)}{T} = L \cdot \left( 1 + \sum_{v \in D(u)} \xi_u(v) \right) \quad (4)$$

由  $N$  个传感器节点组成的传感器网络每一轮将产生  $L \cdot N$  bit 数据。因此, 对于多对一传输的传感器网络, 可以得到离散空间的节点负载密度。

**定义 1** 节点的负载密度: 对于采用多对一传输模式的网络, 任意节点  $u$  的负载密度定义为

$$\rho_u = \frac{\bar{\varphi}_u}{L} = 1 + \sum_{v \in D(u)} \xi_u(v) \quad (5)$$

其物理意义是, 若传感器节点在每一轮数据收集过程中产生 1 bit 数据, 则在每一轮新产生的  $N \times 1$  bit 数据中, 有  $\rho_u$  bit 数据是从节点  $u$  流向 sink 节点的。其中, 有 1 bit 是由节点  $u$  自己产生的, 其他的  $\sum_{v \in D(u)} \xi_u(v)$  bit 是由节点  $u$  的子孙节点通过节点  $u$  流

向 sink 的。从式(5)可以看出, 计算节点负载密度的关键是得到  $\sum_{v \in D(u)} \xi_u(v)$ 。它是由多对一的拓扑传输结构决定的, 反映了节点  $u$  的接收流量负载的大小, 因此本文把它定义为节点  $u$  的接收指数  $f(u)$ 。

**定义 2** 节点的接收指数: 节点  $u$  的接收指数定义为

$$f(u) = \sum_{v \neq u \in V} \frac{\text{num}_u(v, s)}{\text{num}(v, s)} \quad (6)$$

其中  $s$  表示 sink 节点,  $\text{num}(v, s)$  表示从节点  $v$  到 sink 的最短(最小跳数)路径数,  $\text{num}_u(v, s)$  表示节点  $u$  充当节点  $v$  到 sink 的最短路径的中继节点的次数。显然,  $\forall u \in V, f(u) \geq 0$ 。

节点  $u$  的接收指数可视为该节点对于网络中其它节点的数据路由的贡献。假设其他节点均为源节点, 各包含 1 bit 数据, 以相等的概率选择一条最短路径向 sink 节点  $s$  发送数据。如果从源节点  $v$  到  $s$  有  $\text{num}(v, s)$  条最短路径, 其中包含节点  $u$  的有  $\text{num}_u(v, s)$ , 则节点  $u$  有  $\frac{\text{num}_u(v, s)}{\text{num}(v, s)}$  的概率转发节点  $v$  的数据。对于网络中所有的源节点  $v \in V, v \neq u$ , 节点  $u$  将分流期望值为  $\sum_{v \neq u \in V} \frac{\text{num}_u(v, s)}{\text{num}(v, s)} \times 1$  bit 的数据。显然, 当  $\text{num}_u(v, s) > 0$  时, 必有  $v \in D(u)$ , 即只有节点  $u$  的子孙节点才有数据分流到节点  $u$ , 并由  $u$  流向 sink。因此,  $\sum_{v \in D(u)} \frac{\text{num}_u(v, s)}{\text{num}(v, s)}$  就反映了节点  $u$  的子孙节点集  $D(u)$  产生的  $|D(u)| \times 1$  bit 流量中分流到  $u$  的总流量, 故  $\sum_{v \in D(u)} \xi_u(v) = f(u)$ 。

从式(5)和式(6)可以看出, 不同节点之间的流量负载差异本质上是由于拓扑结构对于网络传输数据的分流作用造成的。

### 3.2 任意节点流量负载密度的计算

**定理 1** 网络边缘节点的负载密度最小且恒等于 1, 即当节点  $u$  位于网络边缘时,  $\rho_u \equiv 1 \leq \rho_v, \forall v \in V$ 。

**证明** 当节点  $u$  位于网络边缘时, 它没有子孙节点, 不需要转发其他节点的数据,  $f(u) \equiv 0$ 。而由式(6)可知,  $\forall v \in V, f(v) \geq 0$ 。由式(5), 有  $\rho_v = 1 + f(v) \geq 1 \equiv \rho_u, \forall v \in V$ 。证毕

从定理 1 可知, 网络边缘节点的负载密度是恒定的, 因此可以设计出节点负载密度的分布式算法。这是一种从 sink 节点发起的算法。

**算法 1** 节点负载密度的计算:

(1) 网络中所有节点的负载密度初始化为 1, 即  $\forall v \in V, \rho_v = 1$ 。

(2) 由 sink 启动一个洪泛过程, 向邻居节点广播其到 sink 的跳数值(梯度), 建立多对一的数据传输结构。每一个节点存储接收到的梯度, 递增后向邻居节点传输。其中, 当节点从邻居收到一个梯度时,

它把这个值与本地梯度进行比较。如果本地梯度大于接收值, 节点更新其梯度, 递增该值后重新向邻居传输, 否则既不更新也不转发。通过执行该过程, 每一个节点  $v$  获得了自己和相邻节点到达 sink 的梯度值, 并把梯度值比自己小的相邻节点存入父节点的列表  $P_v$ , 把梯度值比自己大的相邻节点存入子节点的列表  $S_v$ 。

(3) 当节点  $w$  发现没有比自己梯度更大的节点时, 就启动负载密度的计算过程, 把负载密度  $\rho_w \equiv 1$  和父节点集的大小  $|P_w|$  广播出去。

(4) 当节点  $u$  的梯度  $h(u) > 0$  时, 每接收到一个子节点  $v$  的广播消息, 就更新一次负载密度, 即  $\rho_u = \rho_u + \rho_v / |P_v|$ 。当接收完所有子节点的广播消息后, 节点  $u$  再把自己的负载密度  $\rho_u$  和父节点集的大小  $|P_u|$  广播出去。

(5) 当到达梯度为 0 的 sink 节点时, 算法终止。

通过执行算法 1, 每一个节点只需要进行局部的消息交换就可以自动计算出自己的负载密度, 从而获得离散网络空间下的流量负载密度分布。

## 4 多对一网络的负载均衡

节点负载密度的大小直接关系到节点在传感器网络中能量消耗的速率, 从而决定了网络的生命期。根据负载密度的定义和算法 1 可以计算出任意分布的传感器网络中的节点负载密度, 掌握传感器网络的流量负载分布和能耗速率分布, 为各种节能协议的设计提供基础。反过来, 也可以考虑利用节点的负载密度分布, 从理论上设计出最优的数据收集结构, 实现传感器网络的负载均衡, 以获得最大的网络生命期。

### 4.1 负载密度与网络生命期

采用通用的一阶射频模型<sup>[16]</sup>作为传感器节点的能量模型, 接收  $k$  bit 数据的能耗为  $E_{rx}(k)$ , 对于传输距离  $d$ , 传输  $k$  bit 数据的能耗为  $E_{tx}(k, d)$ , 即

$$E_{tx}(k, d) = E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (7)$$

$$E_{rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (8)$$

由于所有节点具有相同的通信半径, 故  $d = R$ 。

由式(4)可知, 任意节点  $u$  在每一轮平均需要消耗的能量为

$$\begin{aligned} \bar{E}_u &= E_{elec} \times \sum_{v \in D(u)} \xi_u(v) \times L + (E_{elec} + \varepsilon_{amp} \times R^2) \\ &\times \left( 1 + \sum_{v \in D(u)} \xi_u(v) \right) \times L = \alpha \times \rho_u - \beta \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\sum_{v \in D(u)} \xi_u(v) = f(u)$ ,  $\alpha = (2 \times E_{elec} + \varepsilon_{amp} \times R^2) \times L$ ,  $\beta = E_{elec} \times L$ 。对于给定模型,  $\alpha, \beta$  都是常量,

$\bar{E}_u$  与  $\rho_u$  成正比。因此, 节点的负载密度完全决定了其在网络中的能量消耗速率。

假设节点  $u$  的初始能量为  $\varepsilon_u$ , 则节点  $u$  的生命期为

$$\tau(u) = \frac{\varepsilon_u}{\bar{E}_u} = \frac{\varepsilon_u}{\alpha \times \rho_u - \beta} \quad (10)$$

若传感器网络的生命期  $\tau_N$  等于第一个死亡的节点的生命期, 则可以计算出整个网络的生命期, 即

$$\tau_N = \min(\tau(u)), u \in V \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知, 当网络中所有节点的初始能量相同时, 记为  $\varepsilon$ , 则网络的生命期由负载密度最大的节点决定, 即

$$\tau_N = \frac{\varepsilon}{\alpha \times \max(\rho_u) - \beta}, u \in V \quad (12)$$

### 4.2 基于节点负载密度的网络负载均衡

**定义3** 负载均衡: 当网络中所有节点的负载密度相同时, 达到网络负载均衡。此时, 所有节点将同时耗尽能量, 网络能耗效率实现了最优化。

**定义4** 准负载均衡: 除了最外层的节点之外, 网络中其他节点的负载密度相同时, 达到网络准负载均衡。

**定理2** 当同构的传感器网络采用多对一的多跳传输模式时, 不能实现完全的网络负载均衡。

**证明** 采用反证法。令节点到 sink 的最大跳数为  $h_{max}$ 。当采用多对一的多跳数据传输模式时,  $h_{max} > 1$ 。  $\forall u \in V$ , 若  $h(u) = h_{max}$ , 由定理 1 可知  $\rho_u \equiv 1$ 。若能够实现网络负载均衡, 即  $\forall v \in V$ ,  $\rho_v = \rho_u = 1$ , 则  $f(v) = 0$ , 任意节点  $v$  也是最外层节点,  $h(v) = 1$ , 与  $h_{max} > 1$  矛盾。 证毕

定理 2 说明, 对于多对一的网络传输结构, 不可能实现完全的负载均衡。可以看出, 只有最外层节点在拓扑结构中的地位比较特殊, 没有子孙节点, 其负载必然小于需要转发数据的内层节点。若忽略最外层节点的差异, 只考虑如何实现内层节点的负载均衡, 则可以得到准负载均衡条件。

**定理3** 当所有内层节点的负载密度为  $1 + 1/q$  ( $q > 0$ ), 即当最外层的每 1 个节点具有  $q$  个可选父节点, 次外层到第 2 层的每 1 个节点具有  $q+1$  个可选父节点时, 可以达到准负载均衡。

**证明** 令节点到 sink 的最大跳数为  $h_{max}$ 。当最外层的每一个节点具有  $q$  个可选父节点 ( $q > 0$ ) 时,  $\forall v \in V$ , 若  $h(v) = h_{max} - 1$ , 则  $\rho_v = 1 + 1/q$ 。当次外层到第 2 层的每一个节点具有  $q+1$  个可选父节点时,  $\forall u \in V$ , 若  $1 \leq h(u) < h_{max} - 1$ , 则

$$\begin{aligned} \rho_u &= 1 + \sum_{n=1}^{h_{\max}-h(u)-1} \frac{1}{(q+1)^n} + \frac{1}{(q+1)^{h_{\max}-h(u)-1}} \cdot \frac{1}{q} \\ &= 1 + \frac{1}{(q+1)^{h_{\max}-h(u)-1} q} \left( (q+1)^{h_{\max}-h(u)-2} q \right. \\ &\quad \left. + (q+1)^{h_{\max}-h(u)-3} q + \dots + q + 1 \right) = 1 + \frac{1}{q} \quad (13) \end{aligned}$$

故从第 1 层到第  $h_{\max} - 1$  层所有节点的负载密度均为  $1 + 1/q$ , 达到准负载均衡。证毕

定理 3 说明, 通过构造特殊的网络拓扑结构, 使最外层以内的每一个节点具有相同的拓扑结构, 拥有相同数量的候选子节点, 就可以实现准负载均衡。实际上, 这就是以拓扑传输结构的不均衡抵消数据流向的不均衡。图 2 是当  $q = 2, h_{\max} = 3$  时达到准负载均衡的拓扑结构, 第 1 层和第 2 层所有节点的负载密度都为 1.5。定理 3 得到的结果与文献[8]和文献[9]中的结果类似, 这也说明从微观角度分析得到的节点负载密度与从宏观角度得到的结果具有一致性。

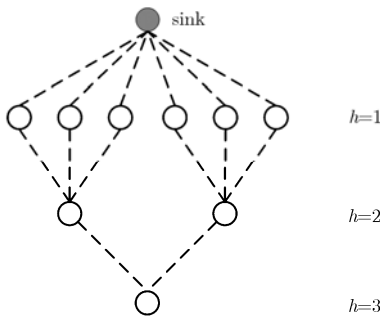


图 2 当  $q = 3, h_{\max} = 3$  时的网络拓扑

### 5 仿真实验

为了在 ns-2 中实现仿真, 采用类似于定向扩散<sup>[17]</sup>的 PEQ 协议<sup>[18,19]</sup>, 仅考虑拓扑结构对于数据传输的影响, 忽略 MAC 层和物理层的竞争与拥塞。首先根据洪泛过程得到各节点到 sink 的梯度, 建立路由表。在每一次启动数据收集过程之前, sink 向各节点扩散兴趣消息。各节点根据消息的内容, 从路由表中随机选择一个上层节点, 向 sink 连续发送感知数据。

#### 5.1 负载密度与能耗速率

传感器节点在一个矩形区域内服从均匀随机分布。sink 位于中心位置, 具有无限能量。包括 sink 在内, 网络中一共有  $N + 1$  个节点, 各项仿真参数见表 1。 $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/bit}, \varepsilon_{\text{amp}} = 100 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m})^2$ 。在每一轮数据收集过程中, 所有传感器节点都是源节点。启动一次消息预约后, 所有源节点连续发送感知数据, 直到出现第 1 个节点死亡时终止。

表 1 仿真参数设定

参数	数值
节点分布区域	200 m × 200 m
sink 位置	(100 m, 100 m)
随机分布的节点数 $N$	200
最大传输半径 $R$	30 m
报头长度	25 byte
广播报文长度	50 byte
数据报文长度	500 byte
初始能量	6 J

根据表 1 中的参数任意生成一个网络拓扑, 如图 3 所示。启动数据收集过程后, 所有节点向传感器节点连续发送感知数据。经过 185 轮数据传输后, 位于(127,104)的节点 11 因能量耗尽而死亡。图 4 是此时各节点的实际能耗分布与理论能耗分布。从图 4 中可以看出, 负载密度能够准确描述各节点的负载分布情况, 负载密度大的节点需要接收和转发更多的数据, 消耗能量的速率更快。

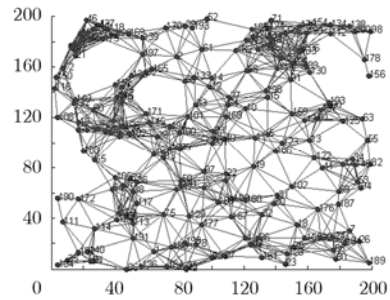


图 3 由 200 个节点构成的网络拓扑

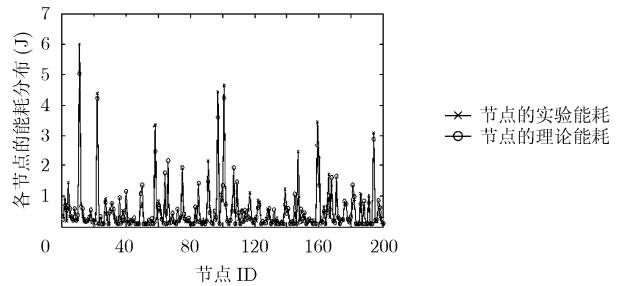


图 4 当第 1 个节点死亡时各节点的能耗分布

#### 5.2 负载密度与负载均衡

当所有传感器节点都是源节点时, 根据定理 2 和定理 3, 只能达到准负载均衡。这里构造一个特殊的拓扑结构。假设有 135 个节点部署在 sink 的周围, 其中到 sink 的最大跳数为 4, 从 1~4 的各层节点数分别为 90,30,10,5, 节点 ID 从最外层向内编号。

传输半径、能量模型及报文长度与 5.1 节中的参数相同。由于采用了特殊拓扑, 启动仿真后, 在每一轮数据传输中, 源节点从上层的父节点中随机选择 1 个作为转发节点, 向 sink 连续发送数据, 直到出现第 1 个节点死亡时终止。

根据式(5)和式(6)可以计算出各节点对应的负载密度, 除了最外层的 5 个节点负载密度为 1 外, 其它节点的负载密度均为 1.5。当执行了 5978 轮数据收集过程后, 节点 114 因能量耗尽而死亡。图 5 是此时各节点的实际能耗分布与理论能耗分布。从图 5 中可以看出, 除最外层的 5 个节点外, 其它节点几乎同时耗尽能量, 实际能耗与从负载密度推出的理论能耗非常接近。

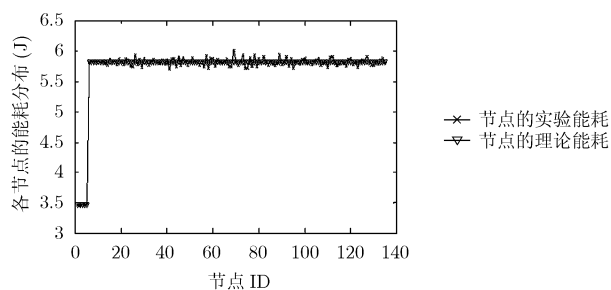


图 5 当第 1 个节点死亡时各节点的能耗分布

综合上述结果可知, 对于任意的网络拓扑结构, 利用负载密度都可以准确估计出任意节点在多对一网络传输中的负载分布; 基于负载密度得到的准负载均衡条件也是正确的, 可以实现大多数传感器节点的负载均衡。特别地, 本文提出的方法不需要对网络节点的分布情况进行任何假设。实际上, 本文所提出的概念和算法是在等概率最短路径条件下通过累加所有可能的数据流量得到的结果, 直接反映了拓扑结构对于流量分布的影响。

## 6 结论

本文从微观角度研究了无线传感器网络的负载均衡问题。首先, 从理论上分析了拓扑传输结构对于节点流量负载的影响, 说明不同节点之间的流量负载差异本质上是由于拓扑结构对于网络传输数据的分流作用造成的。由此, 提出了任意节点负载密度的定义和算法。然后, 基于通用的能耗模型, 分析了节点的负载密度与传感器网络生命期的关系, 进一步论证了在多对一的多跳传感器网络中不能实现完全的负载均衡, 但是通过设计合理的拓扑结构可以实现准负载均衡。最后, 通过仿真实验说明了从微观角度得到的节点负载密度是有效的, 可以准确描述无线传感器网络的流量负载分布, 由此得到

的准负载均衡条件也能实现绝大多数节点的负载均衡。

## 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, and Sankarasubramanian Y, *et al.* Wireless sensor networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38: 393-422.
- [2] Wan C Y, Eisenman S B, and Campbell A T, *et al.* Overload traffic management for sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2007, 3(4): 1-38.
- [3] Basagni S, Carosi A, and Melachrinoudis E, *et al.* Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime[J]. *Springer Wireless Networks*, 2008, 14(6): 831-858.
- [4] Popa L, Rostamizadeh A, and Karp R M, *et al.* Balancing traffic load in wireless networks with curveball routing[C]. *Mobihoc'07*, Montreal, Quebec, Canada, September 9-14, 2007: 170-179.
- [5] Lee J J, Krishnamachari B, and Kuo C C J. Node aging effect on connectivity of data gathering trees in sensor networks[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2004 IEEE 60th, Los Angeles, Sept.26-29, 2004: 4630-4634.
- [6] Pham P P and Perreau S. Performance analysis of reactive shortest path and multi-path routing mechanism with load balance[C]. *IEEE Infocom 2003*, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, California, USA, March30-April3, 2003: 251-259.
- [7] Luo J and Hubaux J P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks[C]. *IEEE Infocom 2005*, Miami, USA, March 13-17, 2005: 1735-1746.
- [8] Wu Xiao-bing, Chen Gui-hai, and Das S K. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(5): 710-720.
- [9] 吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. *计算机学报*, 2008, 31(2): 253-261.  
Wu Xiao-bing and Chen Gui-hai. The energy hole problem of nonuniform node distribution in wireless sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(2): 253-261.
- [10] Hyytiä E and Virtamo J. On optimality of single-path routes in massively dense wireless multi-hop networks[C]. *Proc. of MSWiM'07*, Chania, Crete Island, Greece, October 22-26, 2007: 28-35.
- [11] Hyytiä E and Virtamo J. Near-optimal load balancing in dense wireless multi-Hop networks [C]. *Next Generation Internet Networks*, 2008. NGI 2008, Kraków, Poland, April 28-30, 2008: 181-188.
- [12] Hyytiä E and Virtamo J. On traffic load distribution and load balancing in dense wireless multihop networks[J].

- EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007, (1): 1-15.
- [13] Catamuto R, Toumpis S, and Morabito G. Opti{c,m}al: optical/optimal routing in massively dense wireless networks[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM, 26th IEEE International Conference on Computer Communications, Anchorage, AK, May 6-12, 2007: 1010-1018.
- [14] Ercetin O. Distance-based routing for balanced energy consumption in sensor networks[C]. Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE, New Orleans, USA, Nov. 30-Dec. 4, 2008: 1-5.
- [15] Jacquet P. Geometry of information propagation in massively dense ad hoc networks[C]. MobiHoc'04: Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile Ad hoc networking and computing, Roppongi Hills, Tokyo, Japan, May 24-26, 2004: 157-62.
- [16] Heinzelman W, Chandrakasan A, and Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2000: 3005-3014.
- [17] Intanagonwiwat C, Govindan R, and Estrin D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]. MobiCom'00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (2000), Boston, MA, USA, 2000: 56-67.
- [18] Boukerche A, Pazzi R, and Araujo R. A fast and reliable protocol for wireless sensor networks in critical conditions monitoring applications[C]. MSWiM'04, Venezia, Italy, October 4-6, 2004: 157-164.
- [19] Boukerche A, Pazzi R, and Araujo R. Fault-tolerant wireless sensor network routing protocols for the supervision of context-aware physical environments[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2006, 66: 586-599.
- 解文斌: 男, 1978 年生, 博士生, 研究领域为传感器网络和信息安全.
- 鲜 明: 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 研究领域为信息安全、传感器网络.
- 陈永光: 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 研究领域为电子对抗、传感器网络.